

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.022

国产聚乙烯内衬材料在油田加剂集输工况的适用性

徐广丽^{1,2}, 蒋潇跃¹, 田雨¹, 蔡亮学^{1,2}

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500; 2. 油气消防四川省重点实验室, 成都 610500)

摘要: 为明确复合管内衬材料在油田加剂(添加破乳剂、缓蚀阻垢剂)集输工况的适用性,以采出油和采出水为介质,采用反应釜构建油田加剂集输服役环境来分析国产 JHMG100GW 型高密度聚乙烯(PE-HD)试样在压力 0.8 MPa、温度 25℃ 的加剂条件下浸泡介质前后的形貌和性能变化。结果表明,无论加剂与否,试样在集输介质中浸泡后均产生溶胀现象,加剂后采出油中试样表面产生长度小于裂纹扩展临界值 0.1 mm 的微裂纹;未加剂条件试样体积增率超过标准限定值 5%,加剂条件体积增率满足标准限定要求,而质量增率均小于 5%;添加剂在抑制集输介质渗透的同时,自身也向试样内渗透;试样拉伸强度变化率最大为 +6.72%、断裂伸长率变化率最大为 +34.28%,基本满足标准限定要求;加剂后,采出油、采出水中试样拉伸强度比未加剂分别降低 4.76% 和 10.43%,硬度分别降低 0.7% 和 1.88%,断裂伸长率分别提升 13.2% 和 19.3%,缺口冲击强度分别提高 1.09% 和 5.51%,维卡软化温度最高为 136.8℃,高于初始试样,耐热性能良好。结果表明,国产复合管内衬材料 JHMG100GW 型 PE-HD 可以在加剂工况的集输介质使用。

关键词: 聚乙烯;集输;破乳剂;缓蚀阻垢剂;溶胀;渗透

中图分类号: TQ325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0132-06

Applicability of Domestic Polyethylene Lining Materials in Oilfield Additive Gathering Condition

Xu Guangli^{1,2}, Jiang Xiaoyue¹, Tian Yu¹, Cai Liangxue^{1,2}

(1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Oil & Gas Fire Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to clarify the applicability of composite pipe lining materials in additive (adding demulsifier, corrosion and scale inhibitors) gathering system of oilfields, using a reactor to construct the additive gathering service environment of oilfields under additive condition of 0.8 MPa, 25℃, the morphology and performance changes of domestic JHMG100GW high density polyethylene (PE-HD) samples were studied experimentally before and after soaking medium with produced oil and produced water as medium. It is found that under the non-additive or additive condition, swelling phenomena of the samples all occur after soaking in the gathering medium, and under additive condition, cracks are produced on the surface of the sample in the produced oil with length of less than 0.1 mm of critical value of crack propagation. The volume increase rate in medium without additives exceeds the standard regulation of +5% while it meets the standard range in medium with additives, the mass increase rates of the samples are less than 5%. The additives permeates into samples, meanwhile they inhibits the gathering mediums penetration. The maximal change rate of tensile strength and elongation at break of samples can meet the standard regulations with details as +6.72% and +34.28%, respectively. Compared with the non-additive condition, under the additive condition, the tensile strength and hardness decrease by 4.76% and 10.43%, 0.7% and 1.88%, while the elongation at break and impact strength increase by 13.2% and 19.3%, 1.09% and 5.51% in the produced oil and produced water, the maximal Vicat softening temperature is 136.8℃ and is higher than that the initial sample, which demonstrates the heat resistance is good. The results show that this domestic composite pipe lining material, JHMG100GW PE-HD, can be applied in the gathering system when adding demulsifier, corrosion and scale inhibitor.

Keywords: polyethylene; gathering; demulsifier; corrosion and scale inhibitor; swelling; penetration

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(19CX05007A), 国家自然科学基金项目(51606160, 51779212), 国家科技重大专项项目(2016ZX05025004-005)

通信作者: 蔡亮学, 博士, 讲师, 研究方向为非金属管油田应用、管道内检测

收稿日期: 2022-01-28

引用格式: 徐广丽, 蒋潇跃, 田雨, 等. 国产聚乙烯内衬材料在油田加剂集输工况的适用性[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5): 132-137.

Xu Guangli, Jiang Xiaoyue, Tian Yu, et al. Applicability of domestic polyethylene lining materials in oilfield additive gathering condition[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5): 132-137.

因增强热塑性塑料复合管(RTP复合管)较好地解决了钢管腐蚀问题^[1]以及普通塑料管耐压问题^[2],在石油工业领域得到广泛运用^[3-4]。高密度聚乙烯(PE-HD)耐蚀性良好^[5-6],常用作RTP复合管的内衬材料^[7]。PE-HD与管输介质直接接触可能产生相容性问题^[8],从而影响RTP复合管的性能和使用寿命^[9]。

近年来,PE-HD在介质中的相容性已有一系列研究。蔡亮学等^[10]利用反应釜模拟油田常温集输环境展开实验,发现4731B型PE-HD在常温时适用性良好,6 MPa范围内压力对其性能影响较小。Ghabeche等^[11]发现氯及其衍生物会使PE-HD硬度降低、粗糙度增加。张冬娜等^[12]和戚东涛等^[13]发现H₂S和CO₂在PE-HD中的渗透率较高,且渗透率与温度变化呈正比。徐广丽等^[14]发现PE-HD在油田热洗集输工况下服役后拉伸屈服强度降低、在加热输送工况下表面产生裂纹^[15]。Schoeffl等^[16]发现PE-HD在液态烃环境中发生塑化,导致管道中裂纹缓慢增长。迄今为止,PE-HD内衬与油田加剂(添加破乳剂、缓蚀阻垢剂)集输介质的相容性研究还未见报道。因此,有必要对PE-HD在加剂集输工况的适用性进行试验研究。

笔者以国产JHMG100GW型PE-HD为研究对象,采用反应釜模拟长庆油田加剂集输环境,通过比较服役前后PE-HD试样的体积、质量、形貌、拉伸性能、冲击性能、硬度以及维卡软化温度的变化,明确国产JHMG100GW型PE-HD在加剂集输介质中的适用性。

1 试验部分

1.1 主要原材料

PE-HD: JHMG100GW, 中国石油吉林石化公司;

破乳剂: YT-100-Ⅱ型, 非离子型嵌段聚醚类, 西安奥德石油工程技术有限责任公司;

缓蚀阻垢剂: AD43-3型, 氨基缩合物, 西安奥德石油工程技术有限责任公司;

采出油: 密度为0.8475 g/cm³的高含蜡、多胶石蜡基原油, 其中蜡含量为11.82%、胶质含量为52.91%, 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司;

采出水: 重碳酸钠水型, 主要包括Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻等离子, 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司。

1.2 主要设备与仪器

单螺杆挤出机: UNIEX75-30型, 螺杆直径75 mm, 长径比30:1, 德国巴顿菲尔辛辛那提公司;

恒温干燥箱: DHG 101-2型, 温度控制范围为室温~300℃, 上虞市沪越仪器设备厂;

高温高压反应釜: PARR 4584型, 最大工作压力20 MPa, 海安石油科研仪器有限公司;

恒温水浴箱: CH1015型, 温度控制范围为10~100℃, 上海衡平仪器仪表厂;

电子天平: BSA124S型, 量程为120 g, 德国赛多利斯集团;

扫描电子显微镜(SEM): Quanta 450型, 可在-165~1500℃环境温度下使用, 美国FEI公司;

电子万能试验机: WSM-20kN型, 试验力测量范围为0~20 kN, 长春市智能仪器设备有限公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC-25A型, 能量范围为0~25 J, 济南科盛试验机设备有限公司;

邵氏硬度计: LX-A型, 刻度盘范围为0~100(HA), 江苏明珠试验机械有限公司;

热变形维卡温度测定仪: MZ-2030型, 适用温度范围为室温~300℃, 江苏明珠试验机械有限公司。

1.3 试样制备

将PE-HD粒料放入恒温干燥箱, 在80℃下干燥4 h。将干燥后的PE-HD粒料通过供料系统抽取加入单螺杆挤出机, 挤出温度为200℃。经挤出、冷却、牵引、切割后得到所需板材。

参考GB/T 11547-2008将PE-HD板材加工成50 mm×50 mm×5 mm正方形试样, 用于测量浸泡前后试样的体积、质量、形貌、硬度及维卡软化温度的变化, 平行样3个。依据GB/T 8804.3-2003加工成类型2拉伸试样, 用于测量试样的拉伸性能, 平行样4个。按照GB/T 1043.1-2008加工成V型单缺口冲击试样, 用于测量试样的冲击性能, 平行样4个。

1.4 试验方案

将试样分为5组进行挂片试验, 1[#]为初始样, 2[#], 3[#]为未加剂对照组, 4[#], 5[#]为加剂试验组, 2[#]~5[#]的具体挂片试验方案见表1。加剂试验环境与油田加剂集输现场一致, 介质为井口采出油、采出水, 温度为25℃, 压力为0.8 MPa, 利用高温高压反应釜进行密闭浸泡。前期研究发现6 MPa以内压力对测试结果影响极小, 为方便试验进行, 对照组压力取0.1 MPa, 利用恒温水浴箱进行密闭浸泡。通过挂

片试验分析这两种环境条件下试样在试验介质中浸泡前后的性质变化。

表 1 挂片试验方案

试验条件	试样编号			
	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
温度/℃	25	25	25	25
压力/MPa	0.1	0.1	0.8	0.8
试验介质	采出油	采出水	采出油	采出水
工况	未加剂	未加剂	加剂	加剂
浸泡时间/h	168	168	168	168

注:未加剂工况指没有添加任何添加剂,加剂工况指添加破乳剂、缓蚀阻垢剂,其浓度均为 50 mL/m³。

1.5 性能测试与表征

耐液体化学试剂性能测试:分别利用溢水法和电子天平测量正方形试样在试验介质中浸泡前后的体积与质量。浸泡前后试样均在室温下状态调节 5 h 后测量其体积与质量,由浸泡后与浸泡前的体积和质量变化除以其初始体积和质量,分别得到体积变化率及质量变化率(变化率数值前的 - 表示减少, + 表示增加,下同)。

SEM 表征:将试样放在液氮中脆断,喷金后利用 SEM 在 20 kV 加速电压下观察试样的表面及断面形貌。

力学性能测试:按 GB/T 2918-2018,将初始样及浸泡后试样在室温下状态调节 5 h 后进行力学性能测试。根据 GB/T 8804.3-2003 测试试样的拉伸性能,拉伸速率为 50 mm/min,记录应力-应变数据直至试样断裂。按照 GB/T 1043.1-2008 测试试样的缺口冲击强度,保证试样缺口中央处于冲击平面上。

硬度测试:依据 GB/T 2411-2008 测量试样的硬度,每个样品取 5 个测量点,试样与压座接触后 1 s 内读数。

维卡软化温度测试:根据 GB/T 1633-2000 采用 A₁₂₀ 法测量试样的维卡软化温度。

ISO 23936-1:2009 与 GB/T 34903.1-2017 中规定了热塑性塑料管道衬里(内衬)相容性试验合格性技术指标:目测试样表面无溶解、开裂、鼓泡或物理变形;质量变化率 $\pm 5\%$;体积变化率 $-1\% \sim +5\%$;拉伸强度变化率 $\pm 20\%$;断裂伸长率变化率 $\pm 30\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 体积变化与质量变化

计算试样在不同条件介质中浸泡后与浸泡前的体积差(质量差)与浸泡前初始试样的体积(质量)之比,进而得到的试样体积变化率(质量变化

率)见表 2。

表 2 2[#]~5[#] 试样的体积、质量变化率 %

项 目	试样编号			
	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
体积变化率	+6.60	+7.90	+2.44	+4.47
质量变化率	+1.15	+0.01	+1.11	+0.06

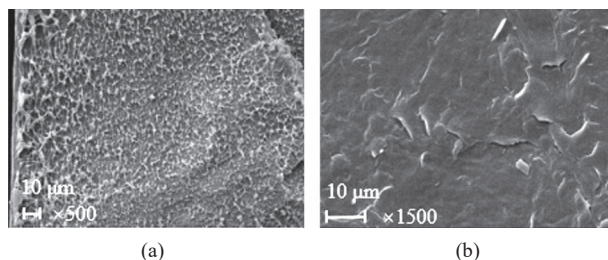
由表 2 可以发现,试样由于介质渗透而体积增大;采出水中试样体积增率大于采出油,说明采出水由于分子量小比采出油更易渗透;加剂后采出油中试样体积增率降低 63.0%、采出水中试样体积增率降低 43.4%,说明破乳剂、缓蚀阻垢剂对集输介质向试样的渗透均有抑制作用。试样浸泡 168 h 后的最大体积增率为 7.9%,超过了 GB/T 34903.1-2017 标准中规定的体积变化范围 ($-1\% \sim +5\%$),而添加破乳剂、缓蚀阻垢剂后试样的体积增率符合标准要求。

同时,由表 2 可见,试样在集输介质中浸泡后质量增加,说明在采出油、采出水中 PE-HD 试样产生溶胀现象;由于油分子量远大于水,采出油中试样质量增率显著高于采出水;加剂后采出油中试样质量增率较未加剂时仅减小 3.5%、采出水中试样质量增率较未加剂时增大 500%,可以认为破乳剂、缓蚀阻垢剂阻碍采出油、采出水向试样渗透的同时,自身也向 PE-HD 试样内部渗透。试样浸泡 168 h 后的最大质量增率为 1.15%,远小于 ISO 23936-1:2009 标准中规定的 5% 指标,满足 PE-HD 在介质中相容性的要求。

2.2 形貌变化

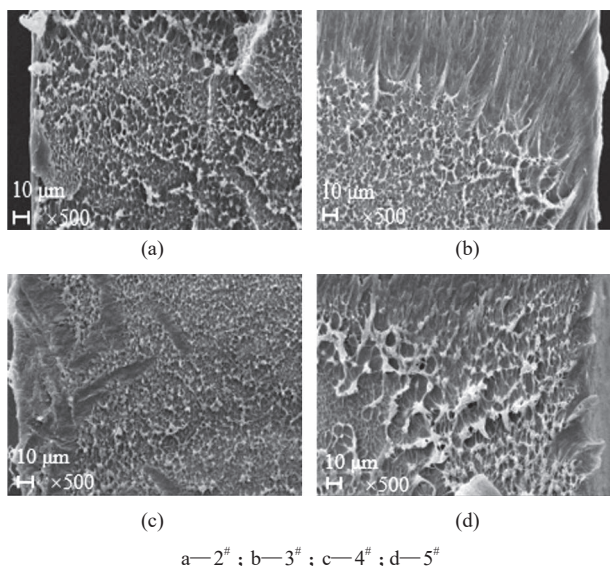
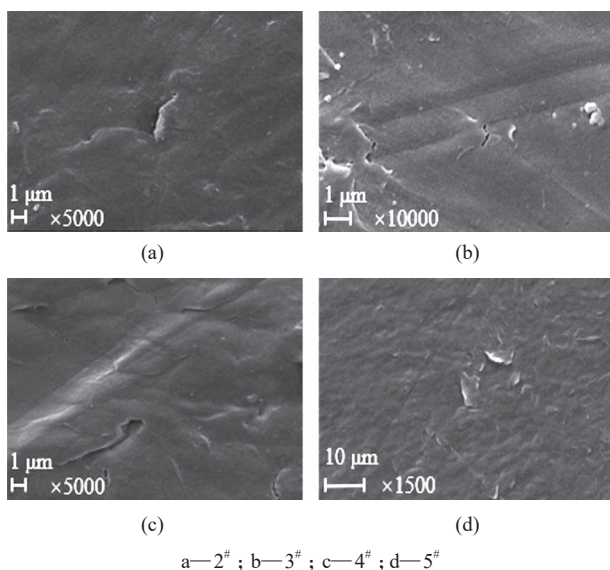
试样浸泡前表面为乳白色,未加剂采出水中试样浸泡后颜色变化不明显,加剂采出水中试样略有变黄,说明分子量较大的黄色粘稠状水溶性 YT-100-Ⅱ型破乳剂可以渗透进入 PE-HD 材料,采出油中试样变黄明显,证实原油和添加剂均会经 PE-HD 表面向内部渗透、扩散。

不同条件下试样的断面、表面微观形貌分别如图 1~图 3 所示。由图 1~图 3 可知,与初始样对比,介质中浸泡后试样断面交联结构分布被破坏,边



a—断面; b—表面

图 1 1[#] 初始样的断面和表面 SEM 照片

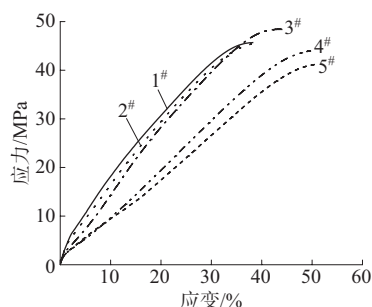
图2 2[#]~5[#]试样的SEM断面形态图3 2[#]~5[#]试样的SEM表面形态

缘颜色加深,表明无论集输介质是否加剂,均会向试样内部渗透,使试样表面出现不同程度的老化。加剂条件下,在采出油中试样表面观察到了长度约为4.1 μm的裂纹,这说明PE-HD试样在压力、采出油介质和添加剂共同作用下产生微裂纹,裂纹长度小于裂纹扩展临界值0.1 mm^[17];采出水中试样表面出现轻微泛白。实际集输过程中,微裂纹的出现会加速介质的渗透,同时介质渗透使裂纹尖端产生拉应力而进一步扩展,可能导致介质渗透过PE-HD内衬层、进入增强层,影响粘胶的粘结力,引起钢丝腐蚀,使得RTP管道承压能力降低。

2.3 力学性能变化

(1) 拉伸性能。

图4为不同条件服役后,PE-HD试样在拉伸速

图4 1[#]~5[#]试样的拉伸应力-应变曲线

率为50 mm/min时的拉伸应力-应变曲线。由图4可以看出,试样经过服役后拉伸性能变差,破乳剂、缓蚀阻垢剂存在时试样的拉伸性能降低幅度最大,未加剂集输介质条件下的拉伸性能与初始样更为接近。

根据各平行试样拉伸应力-应变曲线,得到不同条件下试样的平均拉伸数据,结果见表3。由表3可知,试样在集输介质中的断裂伸长率均增加;未加剂时,在采出油、水中试样拉伸强度分别变化-1.08%和+6.72%,断裂伸长率分别增加13.50%和12.57%;加剂时,在采出油、水中试样拉伸强度分别降低5.79%和4.42%,断裂伸长率分别增加28.49%和34.28%。加剂后,采出油、采出水中试样拉伸强度比未加剂分别降低4.76%和10.43%,断裂伸长率则分别提升13.2%和19.3%。这说明材料在添加破乳剂、缓蚀阻垢剂的集输介质中浸泡后拉伸性能降低、韧性增强。根据GB/T 34903.1-2017中拉伸强度变化率 $\pm 20\%$ 、断裂伸长率变化率 $\pm 30\%$ 的限定,5[#]试样的断裂伸长率变化率略微超过+30%,但PE-HD材料作为管道内衬有钢丝约束,其断裂伸长率变化率略微超出限定属于可接受的范围,因此,认为在集输添加破乳剂、缓蚀阻垢剂工况下,PE-HD材料与集输介质相容性基本满足要求。

表3 1[#]~5[#]试样的拉伸性能及变化率

试样编号	拉伸强度 / MPa	拉伸强度变化率 / %	断裂伸长率 / %	断裂伸长率变化率 / %
1 [#]	45.26		38.36	
2 [#]	44.77	-1.08	43.54	+13.50
3 [#]	48.30	+6.72	43.18	+12.57
4 [#]	42.64	-5.79	49.29	+28.49
5 [#]	43.26	-4.42	51.51	+34.28

(2) 冲击性能。

冲击强度可反映材料的抗冲击能力,不同条件下PE-HD试样的缺口冲击强度见表4。由表4可知,试样服役后缺口冲击强度均下降,其中未加剂采出油、采出水中服役后分别降低2.81%和8.15%,加剂采出油、采出水中服役后分别降低1.72%和2.64%。

加剂后,采出油、采出水中试样的缺口冲击强度与不加剂条件相比分别提高 1.09% 和 5.51%。说明集输介质中添加破乳剂、缓蚀阻垢剂,能提高试样的冲击性能;相同条件下,PE-HD 材料在采出水中服役后缺口冲击强度下降大于采出油。

表 4 1[#]~5[#] 试样的缺口冲击强度及降低率

试样编号	缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	缺口冲击强度 降低率 /%
1 [#]	123.26	
2 [#]	119.80	2.81
3 [#]	113.22	8.15
4 [#]	121.14	1.72
5 [#]	120.00	2.64

2.4 硬度变化与维卡软化温度变化

表 5 为不同条件下 PE-HD 试样的硬度和维卡软化温度。由表 5 可知,PE-HD 材料在不同条件下服役后硬度均产生变化,其中未加剂条件下的变化率显著高于加剂条件。这说明破乳剂、缓蚀阻垢剂与集输介质共同向材料内部渗透时,试样硬度比集输介质单独渗透变化更小。加剂后,采出油、采出水中试样硬度与不加剂条件相比分别降低 0.7% 和 1.88%

表 5 1[#]~5[#] 试样的硬度、维卡软化温度及变化率

试样编号	硬度	硬度变化率 /%	维卡软化温度 /℃	维卡软化温度变化率 /%
1 [#]	95.57		134.1	
2 [#]	97.75	+2.28	135.9	+1.34
3 [#]	97.13	+1.63	135.6	+1.12
4 [#]	97.08	+1.58	136.7	+1.94
5 [#]	95.33	-0.25	136.8	+2.01

另外,由表 5 可知,PE-HD 试样在不同条件服役后维卡软化温度均有一定程度的增大。加剂条件下,试样维卡软化温度由初始的 134.1℃ 增大为最高 136.8℃,说明材料在油田加剂集输工况下耐热性能良好。

3 结论

通过模拟油田集输工况,讨论了在集输介质中添加破乳剂、缓蚀阻垢剂对国产 JHMG100GW 型 PE-HD 形貌和性能的影响,得到如下结论。

(1) 破乳剂、缓蚀阻垢剂会抑制集输介质浸入试样内部、降低试样溶胀程度,同时也会向试样内部渗透。与未加剂工况相比,加剂后采出油中试样体积增率降低 63.0%、质量增率减小 3.5%,采出水中试样体积增率降低 43.4%、质量增率增大 500%。

(2) SEM 表征结果表明,在采出油、采出水服役后,材料表面出现不同程度老化,产生的微裂纹长度小于裂纹扩展临界值 0.1 mm。

(3) 试样拉伸强度变化率最大为 +6.72%、断裂伸长率变化率最大为 +34.28%,基本满足标准限定要求。与未加剂相比,加剂时试样拉伸强度、硬度降低,断裂伸长率、缺口冲击强度、维卡软化温度升高。

(4) 国产 JHMG100GW 型 PE-HD 在加剂条件下满足性能要求,可以在油田加剂集输工况使用。

参考文献

- [1] 于柏峰. 油气输送用柔性增强热塑性管道研究和应用[J]. 纤维复合材料, 2018, 35(4):29-33, 12.
Yu Baifeng. Research and application of reinforced thermoplastic pipe in oil and gas transmission pipeline[J]. Fiber Composites, 2018, 35(4):29-33, 12.
- [2] 王大鹏, 孙岩, 张友强, 等. 增强热塑性塑料复合管的现状及进展[J]. 塑料, 2017, 46(4):69-72.
Wang Dapeng, Sun Yan, Zhang Youqiang, et al. Present situation and development of reinforced thermoplastic plastic[J]. Plastics, 2017, 46(4):69-72.
- [3] 程梦鹏, 姚登博. 油气输送 RTP 管道技术现状及应用前景[J]. 油气地面工程, 2016, 35(8):6-8.
Cheng Mengpeng, Yao Dengzun. The present situation and prospects for composite reinforced pipe (RTP) in oil and gas transmission pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2016, 35(8):6-8.
- [4] 徐广丽, 秦绪, 蔡亮学, 等. 集输服役前后钢丝缠绕增强复合管性能变化研究[J]. 压力容器, 2021, 38(8):21-28.
Xu Guangli, Qin Xu, Cai Liangxue, et al. Research on change in properties of composite pipe by cross-winding steel wire before and after service in gathering and transportation system of the oilfield[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(8):21-28.
- [5] Nguyen K Q, Mwiseneza C, Mohamed K, et al. Long-term testing methods for HDPE pipe-advantages and disadvantages:A review[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 246. DOI:10.1016/j.engfractmech.2021.107629.
- [6] 闫永思, 吴纯, 孙萍, 等. 基于碳材料的高密度聚乙烯导热材料的制备[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2):25-29.
Yan Yongsi, Wu Chun, Sun Ping, et al. Preparation of high-density polyethylene thermal conductive materials based on carbon fillers[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):25-29.
- [7] 魏斌, 戚东涛, 李厚补, 等. 增强热塑性复合管在酸性环境下的耐腐蚀性能[J]. 天然气工业, 2015, 35(6):87-92.
Wei Bin, Qi Dongtao, Li Houbu, et al. Corrosion resistance of reinforced thermoplastic pipes in a sour environment[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6):87-92.
- [8] 张猛. 油气田用聚烯烃管材与油气介质相容性评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
Zhang Meng. The compatibility evaluating of polyolefin tubular product with media related to oil and gas production[D]. Xi'an: Xi'an

- Shiyou University, 2018.
- [9] 李平. 油气输送用粘接热塑性复合管截面强度及专用接头优化设计计算 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- Li Ping. Cross-section strength of bonded thermoplastic composite pipe for oil and gas transportation and optimization design calculation of special joint [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [10] 蔡亮学, 雷鸣, 杜鑫, 等. 油田常温集输环境下聚乙烯适用性研究 [J]. 塑料工业, 2020, 48(11): 100–104, 123.
- Cai Liangxue, Lei Ming, Du Xin, et al. Compatibility of polyethylene in oilfield gathering medium at room temperature [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(11): 100–104, 123.
- [11] Ghabeche W, Alimi L, Chaoui K. Degradation of plastic pipe surfaces in contact with an aggressive acidic environment [J]. Energy Procedia, 2015, 74: 351–364.
- [12] 张冬娜, 李厚补, 戚东涛, 等. 柔性管内衬高密度聚乙烯的气体渗透行为研究 [J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 104–110.
- Zhang Dongna, Li Houbo, Qi Dongtao, et al. Gas permeation behaviors of high-density polyethylene as a liner material of flexible pipes [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 104–110.
- [13] 戚东涛, 任建红, 李厚补, 等. H_2S 在多层聚合物复合管材中的渗透规律 [J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 126–130.
- Qi Dongtao, Ren Jianhong, Li Houbo, et al. The permeation law of hydrogen sulfide in multilayer polymer composite oil/gas pipes [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 126–130.
- [14] 徐广丽, 田雨, 黄俊虎, 等. 国产高密度聚乙烯内衬材料在油井热洗工况的适用性 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(7): 118–125.
- Xu Guangli, Tian Yu, Huang Junhu, et al. Applicability of domestic PE-HD lining materials in oil well hot washing condition [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7): 118–125.
- [15] 蔡亮学, 朱国承, 池坤, 等. 长庆油田 4731B 型非金属集输管道老化特性实验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 16–22.
- Cai Liangxue, Zhu Guocheng, Chi Kun, et al. Experimental study on aging characteristics of 4731B non-metal gathering pipelines in Changqing oilfield [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6): 16–22.
- [16] Schoeffl P F, Lang R W. Effect of liquid oilfield-related media on slow crack growth behavior in polyethylene pipe grade materials [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 72: 90–101.
- [17] Mouzakis D E, Zoga H, Galotis C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs) [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(3): 467–475.
- (上接第 125 页)
- [15] 杨婷婷, 高远博, 郑毅, 等. 生物基聚酰胺 56 纤维的热降解动力学及其热解产物 [J]. 纺织学报, 2021, 42(4): 1–7.
- Yang Tingting, Gao Yuanbo, Zheng Yi, et al. Thermal degradation kinetics and pyrolysis products of bio-based polyamide 56 fiber [J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(4): 1–7.
- [16] 刘冰肖, 胡国胜, 张静婷, 等. 长碳链耐高温聚酰胺 10T/66 热降解机理 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(4): 95–98, 102.
- Liu Bingxiao, Hu Guosheng, Zhang Jingting, et al. Thermal degradation mechanism of long carbon chain heat resistant polyamide 10T/66 [J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4): 95–98, 102.
- [17] 宁飞翔, 王少博, 艾丽, 等. 生物基聚对苯二甲酸丙二醇酯的非等温热降解动力学研究 [J]. 合成纤维工业, 2019, 42(5): 31–36.
- Ning Feixiang, Wang Shaobo, Ai Li, et al. Non-isothermal degradation kinetics of bio-based polytrimethylene terephthalate [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2019, 42(5): 31–36.
- [18] 夏超. 尼龙 66 无氧热降解交联行为的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2017.
- Xia Chao. Study on the cross-linking behavior of anaerobic thermal degradation of nylon 66 [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [19] Vyazovkin S, Burnham A K, Criado J M, et al. ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data [J]. Thermochimica Acta, 2011, 520(1–2): 1–19.
- [20] Kissinger H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1 702–1 706.
- [21] Byczyński Ł, Dutkiewicz M, Maciejewski H. Thermal degradation kinetics of semi-interpenetrating polymer network based on polyurethane and siloxane [J]. Thermochimica Acta, 2013, 560: 55–62.
- [22] Pitchaimari G, Vijayakumar C T. Studies on thermal degradation kinetics of thermal and UV cured *N*-(4-hydroxy phenyl) maleimide derivatives [J]. Thermochimica Acta, 2014, 575: 70–80.
- [23] Vyazovkin S, Chrissafis K, Di Lorenzo M L, et al. ICTAC kinetics committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations [J]. Thermochimica Acta, 2014, 590: 1–23.
- [24] Goodman I. The thermal degradation of 66 nylon [J]. Journal of Polymer Science, 1954, 13(68): 175–178.
- [25] Yang Shaohui, Fu Peng, Liu Mingyong, et al. Synthesis of polyundecamethylene 2, 6-naphthalamide as semiaromatic polyamide-containing naphthalene ring [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 118(2): 1 094–1 099.